

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

LENNON VINICIUS ALVES DIAS

**ESTUDO E ANÁLISE DE DIFERENTES MÉTODOS DE
CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2015**

LENNON VINICIUS ALVES DIAS

**ESTUDO E ANÁLISE DE DIFERENTES MÉTODOS DE
CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título e Bacharel em Ciência da Computação, do Departamento Acadêmico de Informática, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Erikson Freitas de Moraes

**PONTA GROSSA
2015**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Informática
Bacharelado em Ciência da Computação



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO E ANÁLISE DE DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS

por

LENNON VINÍCIUS ALVES DIAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 09 de novembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Erikson Freitas de Moraes
Orientador

Prof. Dr. Ionildo José Sanches
Membro titular

Prof. Ms Geraldo Ranthum
Membro titular

Prof. Dr. Ionildo José Sanches
Responsável pelo Trabalho de Conclusão
de Curso

Prof. Dr. Erikson Freitas de Moraes
Coordenador do curso

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

DIAS, Lennon Vinícius Alves. Estudo e análise de diferentes métodos de calibração de câmeras. 2015. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015

Para muitas aplicações de visão computacional é necessário conhecer os parâmetros intrínsecos (distância focal, ponto principal, coeficiente de inclinação e coeficiente de distorção) e extrínsecos da câmera (posição do centro da câmera e orientação da câmera em coordenadas do mundo). Uma vez conhecidos os parâmetros, é possível mapear pontos da imagem a pontos da cena no mundo 3D. O objetivo do trabalho é estudar diferentes métodos de calibração de câmera, considerando as situações mais favoráveis e menos favoráveis de cada método. Para o desenvolvimento do projeto foram utilizados toolbox's de calibração de câmera criados pela comunidade de visão computacional, encontrados com documentações nos sites dos autores.

Palavras-chaves: Visão Computacional. Calibração de Câmera. Toolbox. MATLAB.

ABSTRACT

DIAS, Lennon Vinícius Alves. Study and Analysis of Different Camera Calibration Methods. 2015. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015

For many computer vision applications is necessary to know the intrinsic parameters (focal length, principal point, slope coefficient and distortion coefficient) and camera extrinsic parameters (camera center position and orientation of the camera in world coordinates). Once known the parameters, you can map image points the scene of points in the 3D world. The objective is to study different camera calibration methods, considering the more favorable and less favorable situations of each method. For the development of the project were used toolbox's camera calibration created by the computer vision community, found with documentation on the sites of authors.

Keywords: Computer Vision. Camera Calibration. Toolbox. MATLAB.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do modelo de câmera <i>Pinhole</i>	17
Figura 2 – Representação do sistema de coordenadas no modelo <i>Pinhole</i>	18
Figura 3 – Representação da distorção com o efeito barril	20
Figura 4 – Representação da distorção com o efeito almofada	20
Figura 5 – Utilização do efeito barril em uma imagem.....	21
Figura 6 – Utilização do efeito almofada em uma imagem	22
Figura 7 – Utilização do efeito bigode em uma imagem	22
Figura 8 – Técnicas de correção de distorção radial.....	27
Figura 9 – Perspectiva da projeção do círculo	28
Figura 10 – Detecção automática do alvo de calibração utilizando o <i>Camera Calibration with MATLAB</i>	42
Figura 11 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão distante da câmera, gerada pelo <i>Camera Calibration with MATLAB</i>	43
Figura 12 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão próximo à câmera, gerada pelo <i>Camera Calibration with MATLAB</i>	45
Figura 13 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão próximo e distante à câmera, gerada pelo <i>Camera Calibration with MATLAB</i>	46
Figura 14 – Conjunto de imagens utilizadas no <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab</i>	48
Figura 15 – Leitura dos cantos do padrão realizada de modo manual no <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab</i>	49
Figura 16 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão próximo à câmera, gerada pelo <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab</i>	50
Figura 17 – Gráfico de comparação entre a distância focal estimada pelos <i>toolbox's Camera Calibration with MATLAB (01)</i> e <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab (02)</i>	51
Figura 18 – Ciclo de calibração do <i>Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox</i> , com (a) detecção do padrão, do (b) centro de distorção e a (c) correção da imagem.....	53
Figura 19 – Três pontos de fuga ortogonais estimados pelo <i>Vanishing Point Detection and Camera Calibration</i> a partir de segmentos de linha que se interceptam no infinito	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de calibração obtidos com o <i>Camera Calibration with MATLAB</i> para imagens com padrão distante da câmera.....	44
Tabela 2 – Erros estimados com o <i>Camera Calibration with MATLAB</i> para imagens com padrão distante da câmera	44
Tabela 3 – Parâmetros de calibração obtidos com o <i>Camera Calibration with MATLAB</i> para imagens com padrão próximo à câmera	45
Tabela 4 – Erros estimados com o <i>Camera Calibration with MATLAB</i> para imagens com padrão próximo à câmera	46
Tabela 5 – Parâmetros de calibração obtidos com o <i>Camera Calibration with MATLAB</i> para imagens com padrão próximo e distante à câmera	47
Tabela 6 – Erros estimados com o <i>Camera Calibration with MATLAB</i> para imagens com padrão próximo e distante à câmera.....	47
Tabela 7 – Parâmetros de calibração obtidos com o <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab</i> para imagens com padrão próximo à câmera	50
Tabela 8 – Erros estimados com o <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab</i> para imagens com padrão próximo à câmera	51
Tabela 9 – Parâmetros de calibração obtidos com o <i>Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox</i> para imagem individual	53
Tabela 10 – Parâmetros de calibração obtidos com o <i>Vanishing Point Detection And Camera Calibration</i> para imagem individual	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
LM	Levenberg-Marquardt
S	<i>Scale Matrix</i> (Matriz de Escala)
R	<i>Rotate Matrix</i> (Matriz de Rotação)
T	<i>Translate Matrix</i> (Matriz de Translação)
DLT	<i>Direct Linear Transformation</i> (Transformação Linear Direta)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA.....	9
1.2 PROPOSTA E JUSTIFICATIVA.....	10
1.3 OBJETIVO GERAL.....	10
1.3.1Objetivos Específicos.....	10
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 VISÃO COMPUTACIONAL	12
2.2 TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS	13
2.2.1 Coordenadas Homogêneas.....	14
2.2.2 Transformação de Escala	14
2.2.3 Operação de Translação.....	15
2.2.4 Operação de Rotação.....	16
2.3 MODELO DE CÂMERA	17
2.4 DISTORÇÕES NAS LENTES	19
2.4.1 Distorção Barril.....	21
2.4.2 Distorção Almofada.....	21
2.4.3 Distorção Bigode.....	22
3 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS	23
3.1 MÉTODO DE ZHANG.....	24
3.2 MÉTODO DE HARTLEY E KANG	26
3.3 MÉTODO DE HEIKKIL E SILVEN.....	27
3.4 MÉTODO DE BAKSTEIN E HALÍR	29
3.5 MÉTODO <i>VANISHING POINTS</i>	30
3.6 MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO	32
3.6.1 Método dos Mínimos Quadrados	32
3.6.2 Método Levenberg-Marquardt.....	34
3.7 <i>TOOLBOX'S</i> DE CALIBRAÇÃO	35
3.7.1 <i>Camera Calibration with MATLAB</i>	35
3.7.2 <i>Camera Calibration Toolbox for Matlab</i>	36
3.7.3 <i>Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox</i>	37
3.7.4 <i>Vanishing Point Detection and Camera Calibration</i>	37
4 DESENVOLVIMENTO	39
4.1 EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS	39
4.2 GERAÇÃO DAS IMAGENS	40
4.3 EXECUÇÃO DOS MÉTODOS ESTUDADOS	40
5 EXPERIMENTOS REALIZADOS	42
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	55
6.1 CONCLUSÕES.....	55
6.2 TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Talvez a visão seja o sentido mais importante do ser humano. É através desse sentido que são realizadas diversas tarefas do dia-a-dia, como por exemplo, identificar pessoas, locais e objetos, estimar distâncias, velocidade e altura. Além disso, em diversas ocasiões, a visão pode perceber a presença de perigo bem antes dos outros sentidos. Todas essas tarefas são bem mais complexas sem o uso da visão. Em vista disto, para a solução de problemas em diversas áreas do conhecimento humano, é natural o uso de percepção visual, ou seja, câmeras e sistemas de visão computacional.

Uma câmera pode ser utilizada para extração de várias informações referente à cena. Quando essas informações envolvem grandezas geométricas (como comprimento, ângulos, distância, entre outras) é necessário conhecer os parâmetros de calibração da câmera.

Estudar o processo de calibração de câmeras capazes de adquirir imagens digitais traz ganhos significativos a sistemas automatizados baseados em visão, tais como: monitoramento de ambientes, controle de qualidade de linha de produção, entre outras aplicações de detecção e reconhecimento.

1.1 PROBLEMA

Um sistema que gere resultados imprecisos se torna problemático, o que evidencia a necessidade de se alcançar um melhor desempenho, aumentando a confiabilidade e precisão do mesmo. As contribuições do estudo serão úteis não somente à sistemas de segurança, como também às diversas aplicações da visão computacional, como automação industrial, robótica e engenharia biomédica, entre outras. Além de poder auxiliar pesquisas baseadas em localização que exijam um sistema calibrado.

1.2 PROPOSTA E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho analisou e apresentou a utilização de diferentes métodos de calibração em câmeras, analisando a viabilidade da utilização de acordo com o ambiente utilizado.

O trabalho busca estudar, analisar e apresentar os resultados encontrados com o estudo de diferentes métodos de calibração de câmeras. Devido ao não conhecimento de um método eficiente que possa se adaptar aos diferentes tipos de cena de um mundo real, resultados eficientes são de grande importância para sistemas de monitoramento, envolvendo, por exemplo, um sistema de vigilância ou controle de qualidade e até mesmo em direção assistida por computador.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é apresentar resultados obtidos com diferentes métodos de calibração de câmeras.

1.3.1 Objetivos Específicos

Os passos a serem seguidos para a realização do objetivo são:

- Estudar ao menos 3 diferentes métodos de calibração de câmeras;
- Criar o *setup* inicial, configurando a composição da cena e sua iluminação;
- Estudar e adaptar a utilização dos *toolbox's* de calibração para o *setup* criado;
- Analisar e apresentar as vantagens e desvantagens de cada método estudado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Nas próximas seções serão apresentados tópicos relacionados ao tema, como forma de criar o entendimento e a contextualização necessária ao trabalho. A Seção 2.1 apresenta a visão computacional, área responsável pela calibração de câmeras. A Seção 2.2 explica ao leitor as transformações geométricas e a utilização de coordenadas homogêneas, permitindo um melhor entendimento dos métodos citados. A Seção 2.3 descreve o modelo de câmera tradicional *Pinhole*, que serviu como base ao restante do trabalho. A Seção 2.4 apresenta as distorções radiais nas câmeras. O Capítulo 3 define a calibração de câmeras e apresenta a revisão dos métodos de calibração estudados. Ainda nesse capítulo, a Seção 3.6 aborda os métodos de minimização utilizados para aproximar o erro encontrado na calibração, à um resultado aceitável. O Capítulo 4 apresenta a etapa de desenvolvimento do trabalho, dividida nas Seções 4.1, 4.2 e 4.3, onde são encontrados os equipamentos e programas utilizados no trabalho, o método utilizado para gerar as imagens e a execução dos métodos de calibração de câmeras estudados. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com a execução dos métodos e o Capítulo 6.1, os trabalhos futuros e as conclusões finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VISÃO COMPUTACIONAL

Pode-se definir visão computacional como sendo o conjunto de algoritmos através dos quais sistemas baseado em computadores podem extrair informações dos *pixels* (dentro de um contexto específico) que compõem uma imagem (TRUCCO; VERRI, 1998). A grande maioria das técnicas usadas em visão computacional ainda são objetos de pesquisa, pois esta encontra-se em seu estágio inicial, ou seja, o sistema que “vê” está muito distante de ser implementado.

Por isso, os sistemas desse tipo que existem hoje são construídos para aplicações específicas, supõem condições especiais de funcionamento (iluminação, tipo de ambiente, faixa de cor etc.) e aplicam-se apenas a um conjunto limitado de situações. (FRANÇA, 2003).

Na prática, os algoritmos de visão computacional existentes são responsáveis apenas por uma pequena parte do processo de percepção visual. Desse modo, um conjunto desses algoritmos precisa ser aplicado em cascata para formar sistemas mais complexos, assim como ocorre no detector de face apresentado por Wang (2014).

Mesmo assim, apesar das limitações, conhecendo-se bem as técnicas e o problema a ser solucionado, a visão computacional é aplicada com sucesso em diversas áreas do conhecimento, chegando a obter resultados superiores a outras metodologias, como mostra França (2003).

O primeiro passo que torna possível os processos de visão por computador é a calibração das câmeras utilizadas (TRUCCO; VERRI, 1998). Nesse processo são utilizados padrões conhecidos, com coordenadas conhecidas no mundo 3D.

O processo básico consiste de encontrar um mapeamento entre pontos característicos do padrão conhecido e pontos correspondentes no plano da imagem e assim, por meio de processos geométricos, encontrar-se um conjunto de parâmetros que descrevem o posicionamento da câmera no espaço 3D e também as características projetivas que afetam a luz durante a formação da imagem. De posse deste conjunto de parâmetros é possível fazer o processo inverso para estimar características da cena com base nas imagens.

2.2 TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

Os métodos e modelos apresentados neste trabalho utilizam transformações geométricas como escala e posicionamento na imagem. As transformações geométricas agem sobre as coordenadas dos pontos, de modo que, ao desenhar as novas coordenadas transformadas, a imagem também fica transformada (FOLEY *et al.*, 1994).

As transformações geométricas (escala, translação e rotação) citadas podem ser representadas pela Equação 2.1.

$$\begin{aligned}P' &= S.P, \\P' &= T + P, \\P' &= R.P,\end{aligned}\tag{1}$$

onde P' é a matriz original, P' é a matriz resultante após a transformação, S é a matriz de escala, T é a matriz de translação e R é a matriz de Rotação.

Normalmente as transformações geométricas são expressas em coordenadas homogêneas por questões de praticidade. Utilizar as coordenadas homogêneas é importante para tratar as 3 transformações de forma consistente, visto que a translação é uma soma de vetores e as demais (escala e rotação) são multiplicações de vetor por matriz.

Nas próximas seções pode ser encontrada uma explicação mais prática da utilização de coordenadas homogêneas.

2.2.1 Coordenadas Homogêneas

A representação de uma reta 2D é:

$$y = mx + b. \quad (2)$$

Esta equação é não homogênea, pois envolve variáveis e constantes. Formas matemáticas permitem que a equação possa ser normalizada. Para isso multiplicamos a mesma por um fator de homogeneização w :

$$wy = w(mx) + w(b), \quad (3)$$

tendo então:

$$y' = mx' + wb. \quad (4)$$

fazendo-se:

$$\begin{aligned} x &= x'/w, \\ y &= y'/w. \end{aligned} \quad (5)$$

Com a utilização de coordenada normalizada, o espaço de trabalho se altera de n -dimensional para $(n + 1)$ -dimensional. Em geral, utiliza-se o valor $w = 1$ para as operações em coordenadas chamadas de coordenadas homogêneas.

2.2.2 Transformação de Escala

A operação de escala permite fazer com que o objeto observado na imagem pareça maior ou menor. Assim, com a utilização da matriz de transformação informada, a escala é calculada por:

$$S = \begin{bmatrix} sx & 0 \\ 0 & sy \end{bmatrix}$$

(6)

sendo sx o fator de mudança de escala na horizontal e sy o fator de mudança de escala na vertical. Em coordenadas homogêneas, representa-se para as 3 dimensões:

$$S = \begin{bmatrix} sx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & sy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & sz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(7)

onde sz é o fator de escala no eixo " z ".

2.2.3 Operação de Translação

A operação de translação permite mover um objeto de um ponto a outro, onde tem-se:

$$T = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}$$

(8)

sendo dx o fator de deslocamento horizontal e dy o fator de deslocamento vertical. Em coordenadas homogêneas, representa-se para as 3 dimensões:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(9)

2.2.4 Operação de Rotação

Quanto a operação de rotação em 2D de um objeto em um ângulo θ com relação à origem, em torno do eixo z tem-se:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

Em coordenadas homogêneas, representa-se uma rotação de θ em torno do eixo z como:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

As rotações possuem também outras duas representações matriciais, além da rotação no eixo z (onde variam os valores de x e y no sistema de coordenadas) apresentada na equação 2.11, a rotação no eixo y em coordenadas homogêneas é representada por:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

E a rotação no eixo x em coordenadas homogêneas é representada por:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ 0 & \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3 MODELO DE CÂMERA

O modelo de câmera utilizado como referência no trabalho é o *Pinhole* (traduzido livremente como buraco (*hole*) de alfinete (*pin*)). Esse modelo é utilizado em uma grande variedade de câmeras, sendo encontrado em várias literaturas da visão computacional, como em Kannala e Brandt (2004) e Courbon *et al.* (2007). Como mostra a Figura 1, baseia-se no princípio da câmera escura, onde o Objeto 3D (5) tem sua projeção 2D (2) no plano da imagem (1). No pequeno orifício (3), *Pinhole*, é captada a luz para dentro da câmera e assim, projetada. O mecanismo de projeção é semelhante ao olho humano, com orientação contrária. Contudo apenas uma entrada de luz e um plano de projeção ao fundo.

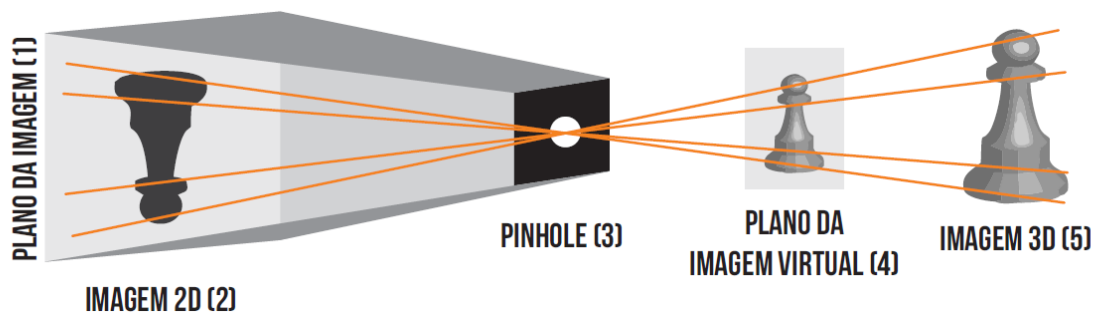


Figura 1 – Representação do modelo de câmera *Pinhole*.
Fonte: Autoria própria.

Os principais elementos, conforme Figura 2, do modelo *Pinhole* são:

- Centro da Câmera: Assume-se que o centro da câmera é o *pinhole* (orifício);
- Plano Principal: Plano formado pelos eixos X e Y posicionado ao centro da câmera;
- Plano da Imagem: Plano que corresponde ao plano de formação da imagem;
- Eixo Principal: Formado pela reta que sai do centro da imagem $[C]$ e intersecta perpendicularmente o plano da imagem;
- Ponto Principal: Ponto onde intersecta o plano da imagem (não necessariamente corresponde ao centro da imagem).

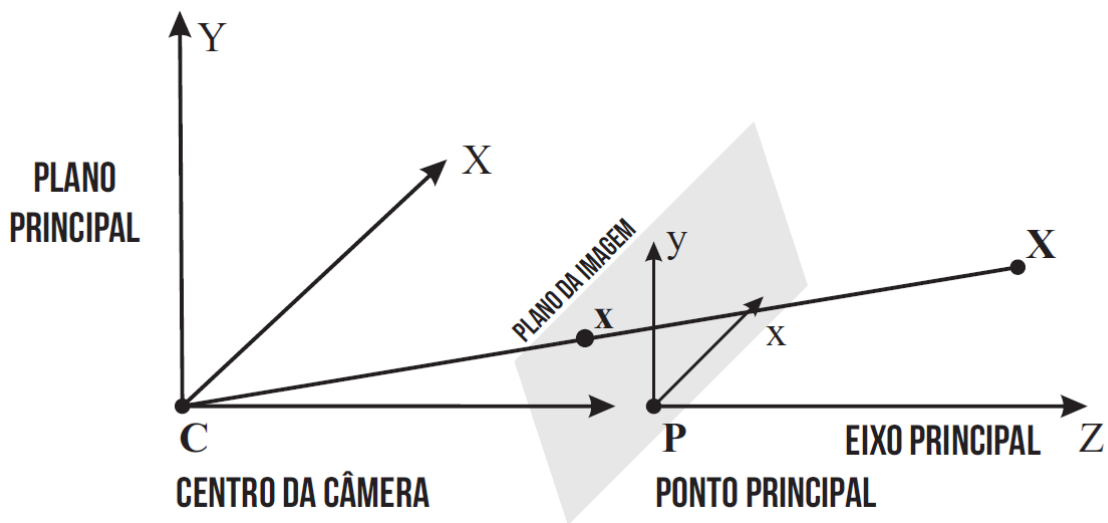


Figura 2 – Representação do sistema de coordenadas no modelo *Pinhole*.
Fonte: Adaptação de Teixeira (2009).

Para relacionar coordenadas de um determinado ponto no espaço com sua projeção no plano da imagem, pode-se utilizar trigonometria. Com o conhecimento da distância focal, ou seja, a distância entre o ponto de convergência da luz até o ponto de projeção da imagem, é possível calcular a projeção de um determinado ponto no espaço por semelhança de triângulos. (KANNALA; BRANDT, 2004).

A operação matricial abaixo representa essa relação trigonométrica.

Seja $P = [X, Y, Z, 1]^T$ um ponto tridimensional no espaço (em coordenadas homogêneas), sua projeção x é dada por:

$$x = \begin{bmatrix} fX/Z \\ fY/Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

(14)

Para relacionar a projeção x com as coordenadas em *pixels* x' na imagem, leva-se em conta os seguintes fatores:

- A posição do ponto principal na imagem;
- Os fatores de escala horizontal e vertical;
- As distorções da lente.

Pode-se então, determinar as coordenadas x' na imagem de um ponto P no espaço, conforme a matriz (K) de parâmetros intrínsecos (ou internos) da câmera

$$x' = K.P = \begin{bmatrix} a_x f & 0 & -v_{cam} \\ 0 & a_y f & -u_{cam} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Em alguns casos pode-se adotar sistemas de coordenadas arbitrários, onde se é necessário aplicar uma transformação rígida dos pontos no espaço para transformar este sistema no modelo adotado até então. Para realizar essa transformação, efetua-se uma rotação e uma translação. Matematicamente, pode-se representar essa transformação em matriz, chamada de parâmetros extrínsecos (KANNALA; BRANDT, 2004).

$$P = [R \quad T] P_w \quad (16)$$

onde R é a matriz de translação, T é a matriz de translação.

2.4 DISTORÇÕES NAS LENTES

Para o processo de calibração é necessário a captura de imagens da câmera. Essas imagens estão sujeitas às distorções devido à imperfeição das lentes (umas mais, outras menos), onde as retas do mundo real não são mais retas na imagem capturada e esse nível de imperfeição se torna mais problemático nas lentes mais baratas, que possuem uma pequena distância focal. Como o problema da calibração de câmera demanda de resultados precisos para a maior confiabilidade do método, os problemas encontrados devem ser corrigidos afim de ficar o mais próximo possível da precisão real (*baseline*).

Uma distorção pode ser entendida como um esticamento não uniforme da imagem, onde o centro e as bordas foram ampliados em proporções (formas)

diferentes, conforme as figuras 3 e 4. Dentre as distorções existentes, a mais comumente encontrada é a distorção radial, que se evidencia nos cantos da imagem. Esta distorção pode ser classificada em três tipos: barril, almofada e bigode (ou completa).

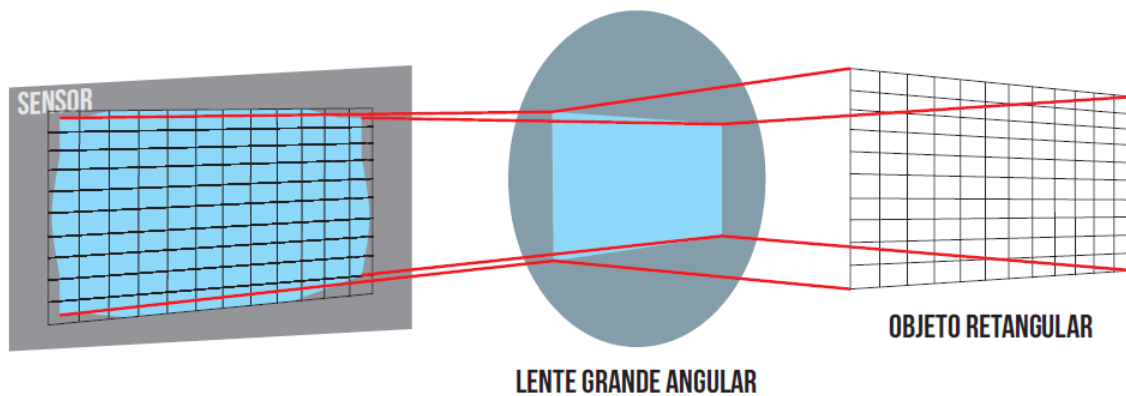


Figura 3 – Representação da distorção com o efeito barril.
Fonte: Autoria própria.

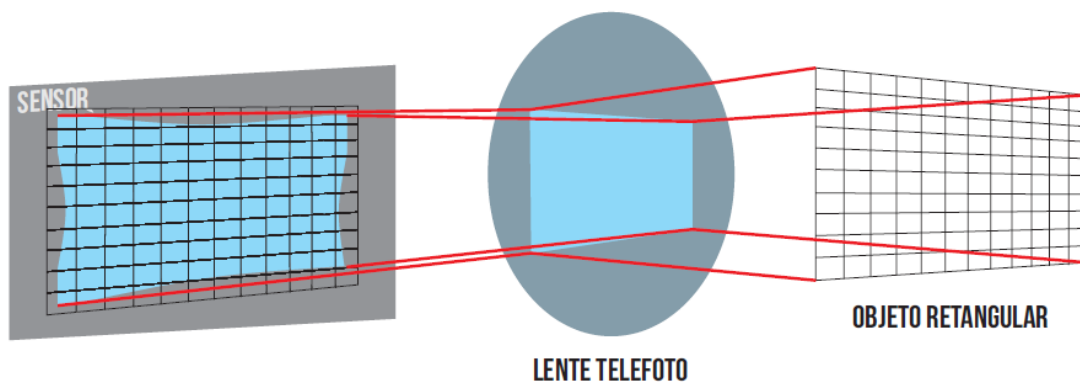
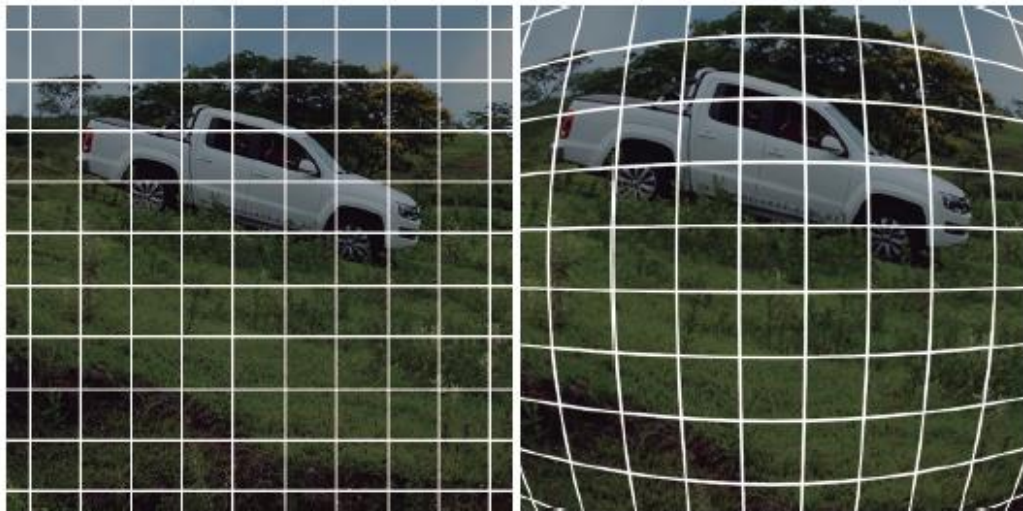


Figura 4 – Representação da distorção com o efeito almofada.
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

2.4.1 Distorção Barril

A distorção Barril é encontrada principalmente em lentes grande angulares (lentes de curto alcance, mas com um grande campo de visão). A característica desta distorção é possuir o centro da imagem mais ampliado do que suas bordas. A Figura 5 mostra um exemplo desse efeito.



**Figura 5 – Utilização do efeito barril em uma imagem.
Fonte: Autoria própria.**

2.4.2 Distorção Almofada

As lentes telefoto (ou teleobjetiva), usadas para longo alcance, geralmente tem o problema da distorção Almofada em suas imagens capturadas. Esta distorção ocorre quando as bordas da fotografia possuem maior ampliação do que o centro, conforme Figura 6.

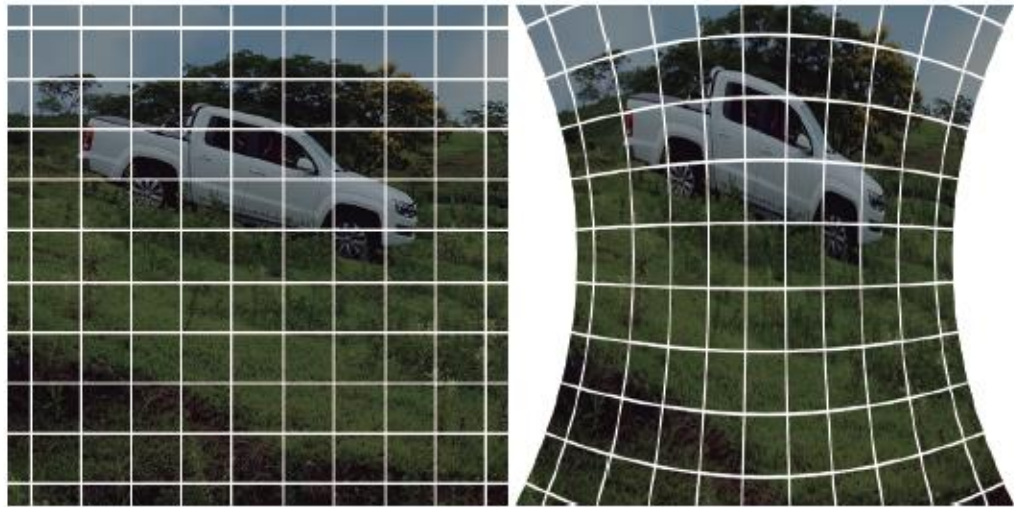


Figura 6 – Utilização do efeito almofada em uma imagem
Fonte: Autoria própria.

2.4.3 Distorção Bigode

A mistura entre as distorções Barril e Almofada é conhecida como distorção Bigode (ou distorção completa), onde a parte central da imagem apresenta as características da distorção Barril e as suas extremidades apresentam distorções no formato Almofada, conforme Figura 7.

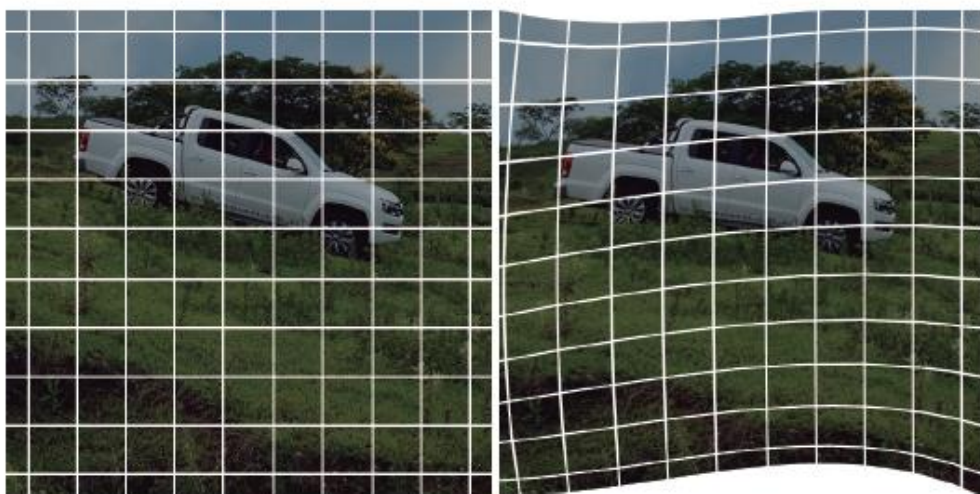


Figura 7 – Utilização do efeito bigode em uma imagem.
Fonte: Autoria própria.

3 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS

Basicamente, o processo de calibração de câmeras, consiste em estimar o conjunto de parâmetros que definem a câmera (SOUZA; CAMPOS, 1998). Os parâmetros são nomeados como: intrínsecos que correspondem às características ópticas da câmera e extrínsecos que indicam a posição da origem do sistema de coordenadas da câmera em relação à origem das coordenadas do mundo 3D.

A calibração do sistema precisa determinar uma correspondência entre os dados medidos no plano de imagem e os dados em um sistema de coordenadas tridimensional conhecidos no espaço 3D. Tal correspondência pode ser obtida através da modelagem de uma colineação entre dois planos como mostrado em Hermosillo e Monterrey (1997).

Alguns trabalhos como Hieronymus (2012), mostram metodologias que não necessitam do conhecimento prévio dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera utilizada, devido a características específicas do trabalho correspondente.

O processo de calibração consiste na estimação dos parâmetros da matriz P , conforme modelo apresentado na Seção 2.3.

$$x' = P X = K [R \ T] X \quad (17)$$

As câmeras fazem parte das atividades do homem a muito tempo, seja monitorando suas ações ou registrando seus momentos, para os tornar “inesquecíveis”. Ao final do século XX foram introduzidas as câmeras *pinhole*, um modelo barato que ganhou popularidade, se tornando comum no cotidiano.

A popularização desse recurso, infelizmente, trouxe sua grande desvantagem: uma distorção significativa nas imagens. Para corrigir esse problema, vários métodos foram criados, de modo a determinar uma relação entre as unidades naturais da câmera (expressa em *pixels*) e as unidades do mundo real (expressas em milímetros, centímetros ou metros).

As próximas seções apresentam os métodos de calibração encontrados na literatura, utilizados nesse trabalho.

3.1 MÉTODO DE ZHANG

A técnica proposta por Zhang (2000) requer apenas a câmera observando um padrão planar mostrado em ao menos duas orientações diferentes. A movimentação pode ser feita com a mão a partir da câmera ou a partir do padrão. Essa abordagem utiliza informações entre o plano da imagem (2D) e o mundo (3D), classificando-se como uma técnica mais flexível, com configurações fáceis para que qualquer um possa fazer sua calibração, avançando a visão computacional 3D dos ambientes de laboratório para o mundo real.

Um ponto 2D é definido como $\mathbf{m} = [u \ v]^T$ e um ponto 3D é definido como $\mathbf{M} = [X \ Y \ Z]^T$. Usa-se \tilde{x} para denotar o vetor aumentado da adição de um como último elemento, sendo: $\tilde{\mathbf{m}} = [u \ v \ 1]^T$ e $\tilde{\mathbf{M}} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$.

Sendo a câmera um modelo *pinhole* habitual, a relação entre um ponto 3D \mathbf{M} e a sua projeção de imagem \mathbf{m} é dada por:

$$s\tilde{\mathbf{m}} = A[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}}, \text{ com } A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

onde s é um fator de escala arbitrário, (\mathbf{R}, \mathbf{t}) são matrizes de parâmetros extrínsecos de rotação e translação e \mathbf{A} é a matriz de parâmetros intrínsecos da câmera, com u_0 e v_0 sendo as coordenadas do ponto principal, α e β os fatores de escala da imagem e γ o parâmetro *skew* dos eixos da imagem.

Para a resolução do problema da calibração de câmera, o autor utiliza uma solução analítica seguida de uma técnica de otimização não linear, tendo,

$$\begin{aligned}
B = A^{-T}A^{-1} &\equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{19}$$

Após manipulações matemáticas descritas por Zhang (2000), estima-se o valor de \mathbf{b} , utilizando λ como fator arbitrário de escala. Assim pode-se extrair os parâmetros intrínsecos da matriz \mathbf{B} .

$$\begin{aligned}
v_0 &= \frac{(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})}{(B_{12}B_{12} - B_{12}^2)} \\
\lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0 (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]/B_{11} \\
\alpha &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\
\beta &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\
\gamma &= -B_{12}\alpha^2\beta / \lambda \\
u_0 &= \frac{\gamma v_0}{\alpha} - \frac{B_{13}\alpha^2}{\lambda}
\end{aligned} \tag{20}$$

Uma vez que \mathbf{A} é conhecida, os parâmetros extrínsecos de cada imagem são prontamente calculados.

$$r_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_1, \quad r_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_2, \quad r_3 = r_1 \times r_2, \quad t = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_3 \tag{21}$$

3.2 MÉTODO DE HARTLEY E KANG

O método apresenta a calibração simultânea à função de distorção radial de uma câmera e os parâmetros da calibração interna (HARTLEY; KANG, 2007). Baseia-se na utilização de um padrão planar de calibração capturado em várias imagens, desse modo, a determinação da deformação radial assemelha-se aos métodos populares de calibração, como o proposto por Zhang (2000).

O método não é inteiramente iterativo e, por isso, torna-se rápido e livre do problema dos mínimos locais. Por determinar a distorção radial sem depender de qualquer modelo de distorção particular, torna-se aplicável a uma grande variedade de câmeras de ângulos estreitos, como a *fish eye*. Com o método também é possível calcular o centro da distorção radial, importante na obtenção de melhores resultados.

O cálculo da distorção radial da câmera é baseado em duas ideias principais, a primeira realiza uma analogia entre o deslocamento radial de pontos sobre a distorção radial e o movimento dos pontos de distância, quando uma câmera se move em direção à uma cena. A segunda ideia é a aplicação de restrições simples para resolver a ambiguidade remanescente nas homografias.

Se um grande número de imagens for utilizado, como recomenda Hartley e Kang (2007) um número de 10 imagens para bons resultados, tem-se os pontos distorcidos e não distorcidos dessas imagens. A partir de um gráfico de dispersão do raio, é possível corrigir qualquer outra imagem capturada com a mesma câmera.

A Figura 8 mostra algumas técnicas descritas por Hartley e Kang (2007), tendo sua utilização de acordo com o alvo de calibração planar. O método é simples, robusto, com solução linear e de fácil configuração, a partir do popular método de Zhang (2000).

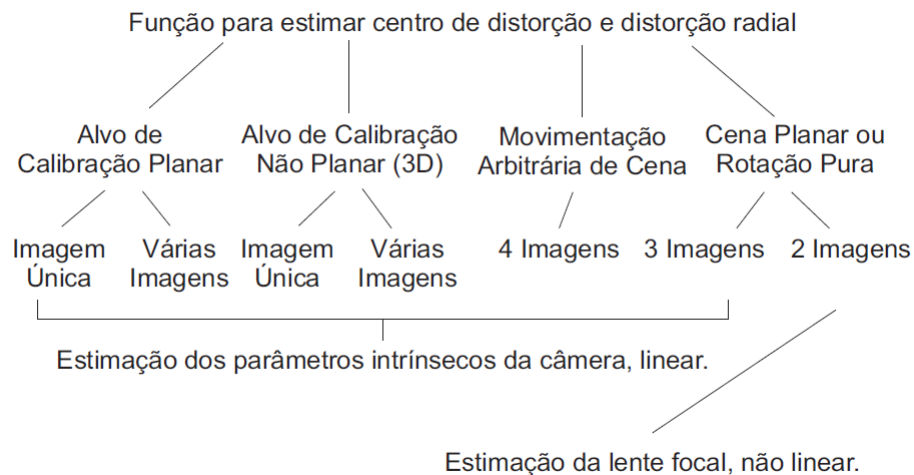


Figura 8 – Técnicas de correção de distorção radial.
Fonte: Adaptação de Hatley e Kang (2007).

3.3 MÉTODO DE HEIKKIL E SILVEN

O artigo de Heikkila e Silvén (1997) apresenta um procedimento de calibração de quatro etapas, que é uma extensão ao modelo de duas etapas. Um passo adicional é utilizado para compensar a distorção causada pelas características circulares e um outro passo para corrigir as coordenadas da imagem distorcida. A correção da imagem é realizada aplicando um modelo empírico inverso que compensa com precisão as distorções radiais e tangenciais. (HEIKKILA; SILVÉN, 1997).

As duas primeiras etapas da calibração acompanham os tradicionais métodos do modelo *pinhole*. Nas demais etapas, Heikkila e Silvén (1997) consideram apenas as características circulares, destacando que uma análise semelhante pode ser feita utilizando recursos arbitrários. Fontes de erro como extração de características (exemplo: mudança na iluminação) também são abordadas.

As projeções em perspectiva geralmente não são boas formas de preservação, pois somente as linhas são mapeadas no plano de imagem. Logo, dois objetos tridimensionais com área de projeção diferente de zero são distorcidos caso eles não sejam coplanares com o plano de imagem. Heikkila e Silvén (1997) preocupou-se com os círculos, devido suas formulações analíticas simples e suas formas muito comuns em vários objetos sintéticos. A distorção causada pela projeção da perspectiva

normalmente não é considerada e, distorce as formas características circulares no plano da imagem, dependendo do ângulo entre a superfície e o deslocamento do objeto e o plano de imagem. Apenas quando a superfície e o plano de imagem são paralelos, as projeções permanecem circular. A Figura 9 ilustra a projeção.

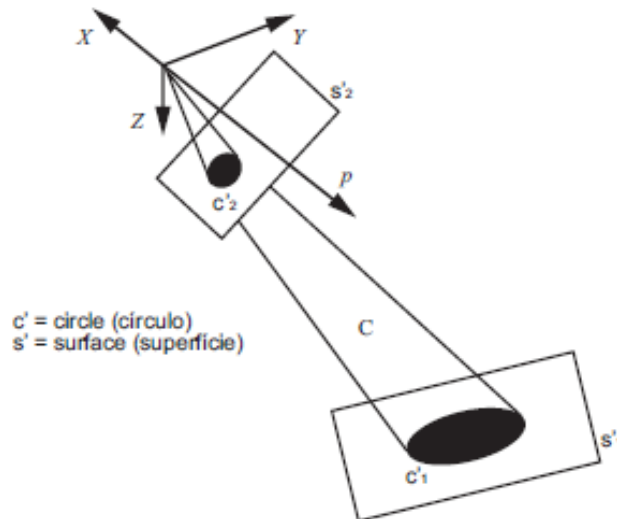


Figura 9 – Perspectiva da projeção do círculo.
Fonte: Adaptação de Heikkila e Silvén (1997).

Após correções, os parâmetros da câmera são recalculados. Segundo Heikkila e Silvén (1997), os parâmetros não são ótimos, mas o erro é pequeno o suficiente para não serem necessárias mais iterações.

O modelo de câmera expressa a projeção dos pontos 3D no plano de imagem, no entanto, não se tem uma solução direta para o problema da *back projection* (sistema de projeção de uma imagem por trás de uma tela para resultar num plano em combinação com outra imagem sobreposta), onde busca-se recuperar a linha de visão a partir de coordenadas da imagem. Quando ambos os componentes de distorção radial e tangencial são considerados, pode-se notar que não existe uma solução analítica para o mapeamento inverso.

As alternativas apresentadas pelo autor são de inferência através de um conjunto de equações ou uma aproximação ao mapeamento inverso. Na literatura são encontradas poucas soluções à esse problema, embora seja comumente encontrado. Para isso, Melen (1994) utilizou uma abordagem iterativa para calcular as coordenadas de imagem não distorcidas, proposta pelo seguinte processo de duas iterações:

$$\mathbf{q}_i' = \mathbf{q}_i'' - \delta(\mathbf{q}_i'' - \delta(\mathbf{q}_i'')) \quad (22)$$

onde os vetores \mathbf{q}_i'' e \mathbf{q}_i' contém a distorção e as coordenadas corrigidas da imagem, respectivamente e a função δ representa a distorção na localização da imagem \mathbf{q} .

Os testes feitos por Heikkila e Silvén (1997) resultaram em um residual máximo de cerca de 0,1 *pixels*. Para algumas aplicações esse resultado pode ser suficiente, porém quando é necessária uma maior precisão, mais iterações devem ser realizadas. Wei e Ma (1993) propôs a resolução do problema determinando um conjunto de parâmetros não físicos ou implícitos para compensar a distorção. Devido a um grande número de parâmetros desconhecidos, esta técnica requer uma rede densa de observações a partir de todo o plano de imagem. No entanto, se os parâmetros físicos forem conhecidos, é possível resolver os parâmetros desconhecidos através da geração de uma grade de pontos e calculando as coordenadas correspondentes na imagem distorcida.

3.4 MÉTODO DE BAKSTEIN E HALÍR

Um novo método de calibração de câmera com base no modelo DLT é apresentado neste artigo, onde o conjunto completo de parâmetros da câmera pode ser obtido a partir de vários pontos de vista dos objetos coplanares de calibração com coordenadas medidas em um alvo 2D. O método consiste de quatro etapas, que são iteradas até a convergência (BAKSTEIN; HALIR, 2000).

O método proposto utiliza múltiplas visões de um alvo de calibração 2D para simular um objeto 3D, necessário para resultados precisos e confiáveis. O padrão pode ser movido livremente entre as aquisições de imagens, sendo os parâmetros intrínsecos da câmera constantes para todos os pontos de vista. Bakstein e Halir (2000) define os quatro passos para a realização do método: A estimativa inicial dos parâmetros intrínsecos da câmera; a estimativa dos parâmetros extrínsecos para cada ponto de vista; a construção de um objeto de calibragem virtual 3D a partir de múltiplos planos 2D; e a calibração da câmera por completo, com base no objeto 3D virtual.

É feita uma estimativa inicial dos parâmetros intrínsecos da câmera, porque as coordenadas do padrão são medidas apenas em 2D. Estes parâmetros são fornecidos pelo usuário no primeiro passo do método proposto. No segundo passo, os parâmetros extrínsecos são estimados para cada ponto de vista capturado.

No terceiro passo, o padrão de calibração virtual em 3D é construído. A construção explora as projeções sobre as posições de câmera para todos os pontos de vista fornecidos na etapa anterior. Os pares de imagem e as coordenadas dos pontos do objeto de calibragem são simulados. Para o quarto passo, um conjunto completo dos parâmetros da câmera é estimado.

O resultado da calibração consiste nos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. Como foi utilizada uma estimativa inicial ao método, uma alternativa para melhorar a precisão do método é a utilização dos parâmetros intrínsecos obtidos novamente na segunda etapa, assim um novo conjunto de parâmetros é estimado (BAKSTEIN; HALIR, 2000).

3.5 MÉTODO *VANISHING POINTS*

O método avalia a precisão da localização de um ponto de fuga. No plano da imagem um ponto de fuga situa-se como a interseção no infinito de segmentos de retas.

São equações de duas linhas retas sobre o plano da imagem:

$$\begin{aligned}x \cdot n_i &= \gamma_i \\y \cdot n_i &= \gamma_i\end{aligned}\tag{23}$$

Onde

$$\begin{aligned}x &= (x, y) \\n_i &= (\cos\theta_i, \sin\theta_i) \\n_j &= (\cos\theta_j, \sin\theta_j)\end{aligned}\tag{24}$$

E γ_i e γ_j são distâncias das linhas retas da origem.

A interseção $P = (x_\infty, y_\infty)$ de duas linhas retas é:

$$\begin{aligned} x_\infty &= \frac{1}{\text{sen}(\theta_2 - \theta_1)} [\gamma_1 \text{sen}\theta_2 - \gamma_2 \text{sen}\theta_1] \\ y_\infty &= \frac{1}{\text{sen}(\theta_2 - \theta_1)} [\gamma_2 \text{sen}\theta_1 - \gamma_1 \text{sen}\theta_2] \end{aligned} \quad (25)$$

E o número condicional c do sistema linear é:

$$c = \frac{1 + |\cos(\theta_2 - \theta_1)|}{1 - |\cos(\theta_2 - \theta_1)|} \quad (26)$$

Para melhorar a robustez contra o ruído, o número condicionado c deve ser o mais próximo possível de 1, portanto, é desejável que $\theta_2 - \theta_1$ seja próximo de 90° .

Dadas n linhas retas paralelas, seu ponto de fuga $x = (x_\infty, y_\infty)$ pode ser encontrado como a média de $n(n-1)/2$ interseções das diferentes linhas retas no plano da imagem.

$$x = (x_\infty, y_\infty) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{k=1}^{n(n+1)/2} x_k \quad (27)$$

Para estabelecer a precisão da localização dos pontos de fuga Caprile e Torre (1990) realizaram simulações em computador.

Foram considerados os pontos finais dos segmentos sobre a imagem, usados para encontrar a intersecção de linhas retas, onde encontrou-se um erro de um ou dois *pixels* e foi calculada a incerteza sobre a localização dos pontos de fuga.

Os autores consideraram a precisão obtida de acordo com a estimativa confiável de parâmetros de calibração, gerando erro absoluto de 1 *pixel* na abscissa e 2 *pixels* na ordenada. (CAPRILE; TORRE, 1990).

3.6 MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO

O processo da calibração de câmeras nos retornam parâmetros que estimam as coordenadas do objeto em relação ao mundo. Os parâmetros retornados, por vezes, podem estar distantes das medidas reais e, para isso, são utilizados métodos que minimizam o erro e ajustam os parâmetros. Dentre os métodos de minimização pesquisados, apresentam-se o método dos mínimos quadrados e o método Levenberg-Marquardt (técnica que utiliza uma variação do método dos mínimos quadrados) que possuem grande popularidade na visão computacional, devido às diversas implementações disponíveis na literatura.

3.6.1 Método dos Mínimos Quadrados

Muitos fenômenos contribuem para que o sistema gerado com o processo da calibração geométrica de câmeras produza erros consideráveis. A redundância no sistema de visão artificial, tendo mais equações do que incógnitas, visa minimizar esses erros. O método dos mínimos quadrados (MMQ) apresenta uma metodologia de resolução desse sistema de equações.

Na prática, para minimizar os erros intrínsecos ao sistema de visão artificial e de truncamento no processamento computacional, utiliza-se um número maior de pontos (da ordem de uma centena) (POLIDORIO; BORTOLOZZI; FIGUEIREDO, 2008).

Utilizando um modelo matemático baseado na equação da reta na forma paramétrica polar, tem-se:

$$(x' - x_0) + \Delta_x \cdot \cos\theta + (y' - y_0) + \Delta_y \cdot \sin\theta - \rho = 0$$

$$\Delta_x = (x' - x_0)[K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6] + [P_1(r^2 + 2(x' - x_0)^2) + 2P_2(x' - x_0)(y' - y_0)]$$

$$\begin{aligned}\Delta_y &= (y' - y_0)[K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6] + [2P_1(x' - x_0)(y' - y_0) \\ &\quad + P_2(r^2 + 2(y' - y_0)^2)] \\ r &= [(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2]^{1/2}\end{aligned}\tag{28}$$

onde $X_0, Y_0, K_1, K_2, K_3, P_1$ e P_2 são os parâmetros intrínsecos da câmera a serem calculados.

Para realizar o MMQ são necessárias 4 etapas de ajustes, a matriz N , o vetor U , o vetor X e o vetor X_a . Dentre as etapas, tem-se 5 elementos que fazem parte do modelo paramétrico, que são:

- ${}_{nxu}A$: Matriz das derivadas parciais das n equações por u parâmetros
- ${}_{nx1}L_0$: Vetor das observações iniciais (pontos extraídos sobre as retas);
- ${}_{n \times n}P$: Matriz "Peso" considerando as observações como "não correlacionadas", ou seja: $P = I$ (Diagonal "1");
- ${}_{ux1}X_a$: Vetor dos parâmetros ajustados.

O coeficiente u utilizado nesses elementos é obtido pela equação:

$$u = 2n + 7\tag{29}$$

onde 2 representa os coeficientes (p e θ) de cada reta extraída, n é o número de retas extraídas e 7 são os parâmetros intrínsecos a serem calculados.

As representações das 4 etapas se modelam pelas equações seguintes:

$$\begin{aligned}{}_{u}N_u &= {}_{u}A_n^t {}_{n}P_n {}_{n}A_u \\ {}_{u}U_1 &= {}_{u}A_n^t {}_{n}P_n {}_{n}L_{01} \\ {}_{u}X_1 &= {}_{u} - N_u^{-1} {}_{u}U_1 \\ {}_{u}X_{a1} &= {}_{u}X_{01} + {}_{u}X_1\end{aligned}\tag{30}$$

3.6.2 Método Levenberg-Marquardt

Utiliza o algoritmo Levenberg-Marquardt (LM), técnica iterativa que localiza o mínimo de uma função e é apresentado como a soma dos quadrados de funções não lineares, tornando-se uma técnica padrão para esse tipo de problema.

O LM pode ser entendido como uma combinação do método gradiente com o método de Gauss-Newton. Quando a solução atual está distante da solução correta, o algoritmo se comporta como o método gradiente (devagar, mas com garantia de convergência), quando a solução está próxima à solução correta, o algoritmo se comporta como o método de Gauss-Newton (FRANÇA *et al.*, 2009). A aproximação segue a equação (modificação do método de Gauss-Newton), com a introdução do parâmetro μ .

$$\Delta_x = [J^T(x)J(x) + \mu I]^{-1}J^T(x)e(x) \quad (31)$$

onde I é a matriz identidade, $e(x)$ é o erro e J é a matriz Jacobiana. O parâmetro μ é multiplicado por um fator (β) toda vez que um passo resultar num aumento na função erro, que se deseja minimizar. Quando um passo resultar na diminuição da função genérica $V(x)$, μ é dividido pelo fator β . Isto significa dizer que, se houver convergência para o mínimo da função, μ é pequeno e o algoritmo se aproxima do método de Newton (passo $1/\mu$); no caso de não haver convergência, o método se aproxima da descida de gradiente. O parâmetro μ funciona como um fator de estabilização do treinamento, ajustando a aproximação de forma a utilizar a rápida convergência do método de Newton e evitando passos muito grandes que possam levar a um erro de convergência. (LOURAKIS, 2005).

Alguns estudos analisam também a vantagem quando a solução do problema conduz a uma matriz Jacobiana esparsa (reduzindo assim a complexidade do problema de n^3 para n). Dado um conjunto de projeções do gabarito em diversas imagens, estimar os parâmetros intrínsecos da câmera e a localização de cada ponto do gabarito no espaço tridimensional (LOURAKIS, 2005). A calibração é monocular

(1D), feita com um bastão com diversas esferas de tamanhos e distâncias conhecidas. Para a utilização desta técnica, é necessário satisfazer algumas condições:

- 3 ou mais pontos;
- 1 desses pontos, M 1 deve ser fixo.

Dessa forma, a projeção do ponto M 1 é a mesma em todas as imagens da sequência. Importante observar que na presença de ruído, a solução do problema de calibração baseada na equação $b = (U_n^T U_n)^{-1} U_n^T L^2$, geralmente, não é satisfatória. Quando a solução de problemas leva a uma matriz Jacobiana esparsa, as iterações podem ser divididas em problemas menores de solução bem menos complexa.

3.7 TOOLBOX'S DE CALIBRAÇÃO

Os métodos estudados serviram como base pelos autores para o desenvolvimento de *toolbox's* que auxiliam a aplicação prática da calibração de câmeras. As próximas seções apresentam os *toolbox's* utilizados no presente trabalho.

3.7.1 Camera Calibration with MATLAB

Calibração da câmera é a estimativa de parâmetros intrínsecos, extrínsecos e de distorção da lente de uma câmera. O *Computer Vision System Toolbox*TM fornece um aplicativo e funções para executar todas as tarefas essenciais no fluxo de trabalho de calibração de câmera, incluindo:

- Detecção e localização do padrão de calibração (*chessboard*) totalmente automática, incluindo a detecção dos cantos com precisão de *subpixel*;
- Estimativa de todos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, incluindo o eixo de inclinação;

- Correção da distorção óptica;
- Suporte para câmera única e calibração estéreo;
- A aplicação *Camera Calibrator* é usada para selecionar e filtrar as imagens de calibração, escolher o número e o tipo dos coeficientes de distorção radial, visualizar reprojeções de erro, parâmetros extrínsecos e exportar os parâmetros de calibração da câmera.

3.7.2 *Camera Calibration Toolbox for Matlab*

O *toolbox* tem seus métodos adaptados da documentação do *Camera Calibration with MATLAB* disponibilizada pela MathWorks® no site oficial de seu produto. Seis exemplos de calibração de câmera foram disponibilizados pelo autor, sendo eles:

- Extração dos cantos, calibração e ferramentas adicionais: Um exemplo de calibração completa baseada em um total de 20 (e 25) imagens de um padrão (*chessboard*) planar. Este exemplo permite a utilização da caixa de ferramentas, onde é possível o carregamento de imagens de calibração, extraindo os cantos da imagem, visualização dos resultados, controle de precisão, entre outros.
- Calibração usando os dados de Zhengyou Zhang: Utiliza os dados de Zhengyou Zhang para a realização dos métodos da calibração em um *script*. O exemplo permite a alteração do modelo da câmera intrínseca, podendo escolher quais parâmetros utilizar.
- Calibração usando os dados de Heikkil (utiliza alvo de calibração planar e não planar): Demonstra o modelo de otimização para alvos não planares.
- Calibração usando os dados de Bakstein e Halir: Exemplo de utilização da calibração utilizando os métodos de Bakstein e Halir.
- Calibração de aparelhagem de som, retificação e triangulação de imagem 3D estéreo: O exemplo mostra a utilização da caixa de ferramentas para calibração de um sistema estéreo (intrínseca e extrinsecamente), retificando imagens estéreo e realizando a triangulação.

- Combinação de duas calibrações independentes em uma mesma câmera: A demonstração de uma calibração envolvendo a combinação de dois conjuntos de dados de calibração em uma mesma câmera criado de forma independente é utilizada nesse exemplo.

3.7.3 *Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox*

O *toolbox* apresenta um método de otimização convexa para correção radial de distorção da lente de uma única imagem de um padrão planar usando as restrições de monotonicidade da função de distorção radial. No método do Hartley-Kang, são necessárias cerca de vinte imagens de um padrão planar tomadas em diferentes orientações e posições, para obter resultados satisfatórios de correção de distorção radial utilizando um método dos mínimos quadrados.

No entanto, utilizando apenas uma imagem com distorção radial de um padrão planar, podem ser obtidos resultados razoáveis, podendo ser melhores que os resultados apresentados por Hartley-Kang na mesma situação.

3.7.4 *Vanishing Point Detection and Camera Calibration*

Para as imagens tiradas em cenas feitas pelo homem, pontos de fuga e distância focal da câmera desempenham papéis importantes na compreensão cena. O *toolbox* apresenta um novo método para rapidamente, com precisão e simultaneamente estimar três pontos ortogonais de fuga (TOVPs) e comprimento focal de imagens individuais. O método baseia-se nas seguintes observações importantes: Se estabelecer um sistema de coordenadas polares no plano de imagem cuja origem está no centro da imagem, o ângulo de coordenadas de pontos de fuga pode ser estimado de forma robusta, procurando picos no histograma.

A partir das coordenadas angulares detectadas, altitudes de um triângulo formado por TOVPs estão determinados. Restrições novas em ambos os pontos de fuga e distância focal podem ser obtidas a partir das três altitudes. Ao utilizar os

constrangimentos, as coordenadas radiais de TOVPs e a distância focal podem ser estimadas em simultâneo. O método decompõe um espaço de parâmetros 2D em dois espaços de parâmetros 1D em cascata, o que torna o método muito mais rápido e mais robusto do que os métodos anteriores, sem perder a precisão.

O algoritmo do *toolbox* não requer que os TOVPs estejam todos longe do centro da imagem e divide um plano de imagem em regiões interiores e exteriores. Utiliza também algumas restrições sobre a simplificação com base em suposição, obtendo uma melhoria significativa em desempenho.

4 DESENVOLVIMENTO

De posse dos conhecimentos adquiridos nos estudos dos métodos descritos no Capítulo 3 e dos equipamentos e programas listados na Seção 4.1, um *setup* foi modelado para a realização do processamento desses métodos. A Seção 4.2 descreve o ponto de partida do procedimento de execução e testes para a calibração da câmera, seguindo a metodologia encontrada na Seção 4.3.

4.1 EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS

Os equipamentos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho foram:

- Câmera Grande-Angular Full HD 5MP Microsoft Lumia 730;
- Notebook Dell Vostro 5480 5^a geração do Processador Intel® Core™ i7-5500U (2.4 GHz expansível para até 3.0 GHz, 4MB de Cache, 15W) com placa de vídeo NVIDIA® GeForce® 830M com memória dedicada de 2GB.

Os programas utilizados foram:

- Sistema Operacional Microsoft Windows® 10; *MathWorks*® MATLAB.

Os *toolbox* utilizados foram:

- *Camera Calibration with MATLAB* disponibilizado pelo *MathWorks*® MATLAB;
- *Camera Calibration Toolbox for Matlab* disponibilizado em <http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/>;
- *Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox* disponibilizado em <<http://swardtoolbox.github.io>>;

- *Vanishing Point Detection and Camera Calibration* disponibilizado em <<http://www.cis.pku.edu.cn/vision/vpdetection/>>.

4.2 GERAÇÃO DAS IMAGENS

A escolha de um local adequado para a aquisição das imagens se tornou importante devido aos diferentes métodos analisados. Esses métodos baseiam-se em um padrão planar de calibração ou desenhos de linhas ortogonais que façam parte do ambiente. Com a escolha do ambiente, foi posicionada uma câmera em uma das diagonais da sala, capturando o padrão em diferentes distâncias e angulações.

Os padrões de calibração irão permitir a captura de pontos de referência a partir da detecção e reconhecimento de características implícitas do seu formato (LOAIZA; RAPOSO; GATTASS, 2010). Com as imagens obtidas, deu-se início ao processamento utilizando os métodos descritos no Capítulo 3 através de *toolbox's* desenvolvidos para a ferramenta de cálculos MATLAB e disponibilizados pelos seus autores.

4.3 EXECUÇÃO DOS MÉTODOS ESTUDADOS

O conjunto de imagens adquiridas no ambiente criado foi utilizado nos 4 *toolbox's* de calibração analisados. Seus resultados foram analisados e comparados entre si. Análises semelhantes, como as de Hieronymus (2012) e Köhler e Westermann (2010) serviram de base para o presente trabalho.

Os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera foram estimados pelos *toolbox's* encontrados. Ao fim, uma etapa de refinamento otimizou os parâmetros de calibração. As soluções satisfazem uma aproximação algébrica linear para um problema que não é linear, como o processo de calibração de câmera (LOAIZA; RAPOSO; GATTASS, 2010).

Assim como nos trabalhos de França *et al.* (2009) e Polidorio, Bortolozzi e Figueiredo (2008), fez-se a verificação dos métodos existentes de otimização e

redução de erros, buscando obter a melhor qualidade de projeção possível. A câmera utilizada foi calibrada de forma independente, de modo à poder expandir a quantidade de câmeras.

O Capítulo 5 demonstra a utilização dos *toolbox's*, assim como os resultados obtidos.

5 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Com a proposta de estudo e análise entre os métodos estudados, foram utilizados 4 *toolbox*'s de calibração de câmeras, documentados e disponibilizados pela comunidade de visão computacional.

Os primeiros testes foram feitos utilizando o aplicativo de calibração disponibilizado pela MathWorks®, *Camera Calibration with MATLAB*. Seu procedimento de calibração consiste em adicionar um grupo de imagens que possuem um alvo de calibração (tabuleiro de xadrez) visível onde serão detectados os cantos do tabuleiro e suas intersecções de linhas que formam os quadrados. O *toolbox* utiliza o método descrito por Zhang (2000) na Seção 3.1.

Nesse *toolbox* foram utilizados grupos separados de imagens, divididas pela distância da câmera ao padrão, sendo um grupo com as menores e outro com as maiores distâncias, permitindo a comparação da precisão de calibração em ambas as cenas. O tabuleiro utilizado teve 7×6 quadrados detectados automaticamente, com a medida de 200mm cada, conforme mostra a Figura 10.

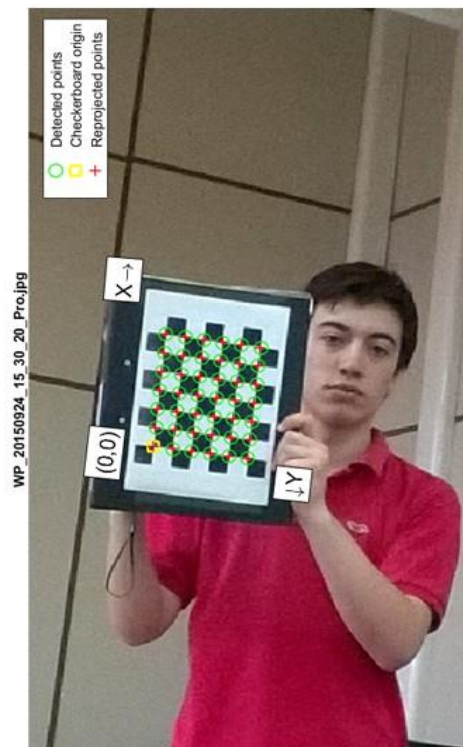
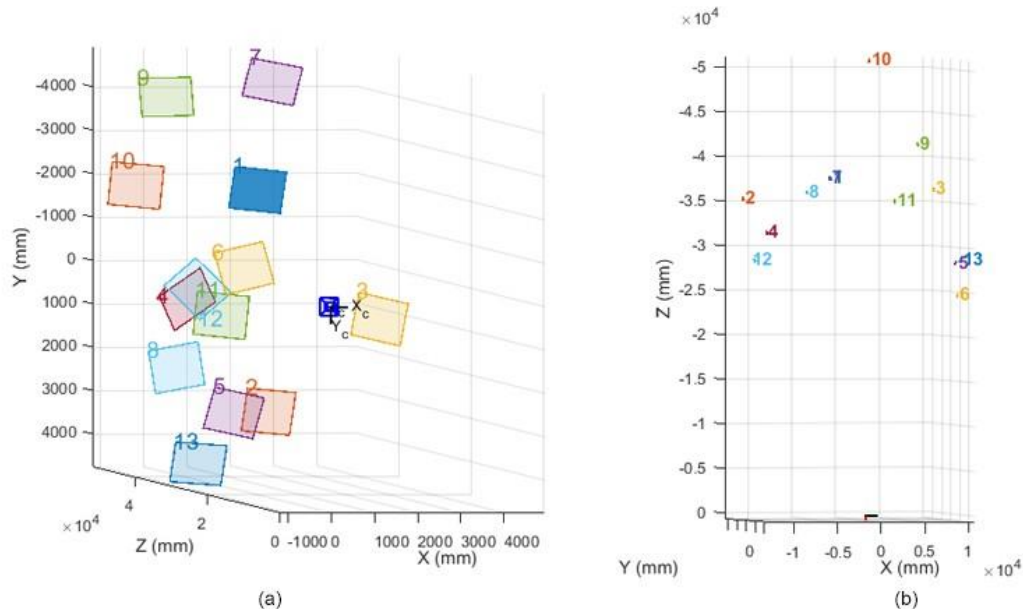


Figura 10 – Detecção automática do alvo de calibração utilizando o *Camera Calibration with MATLAB*.
Fonte: Autoria própria.

O cálculo dos parâmetros extrínsecos da câmera foi realizado com um conjunto de 13 imagens que possuíam visualmente uma maior distância entre o padrão de calibração e a câmera utilizada. A Figura 11 destaca a visualização dos parâmetros obtidos.



**Figura 11 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão distante da câmera, gerada pelo *Camera Calibration with MATLAB*.
Fonte: Autoria própria.**

A Figura 11 (a) mostra a visualização dos alvos (representados pelos quadrados coloridos com seus respectivos números) de calibração projetados à partir do centro da câmera (representada por um quadrado de menor dimensão, com sua posição nos eixos x e y estimada) na visão frontal do plano e (b) apresenta os alvos (representados por números e suas respectivas cores) e o centro da câmera (onde $x = 0$ e $y = 0$) em uma visão superior do plano.

Para esse cenário, os valores obtidos com o processo da calibração estão organizados na Tabela 1, seguidos pelo resultado dos erros estimados, na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros de calibração obtidos com o *Camera Calibration with MATLAB* para imagens com padrão distante da câmera

Parâmetros da Calibração	Valor (pixel)
Distorção Radial	[1.5566 – 23.7367]
Distância da Lente Focal	[3.1045e+03 3.0519 e+03]
Ponto Principal	[1.2079 e+03 803.5924]
Média de Reprodução de Erro	0.2354

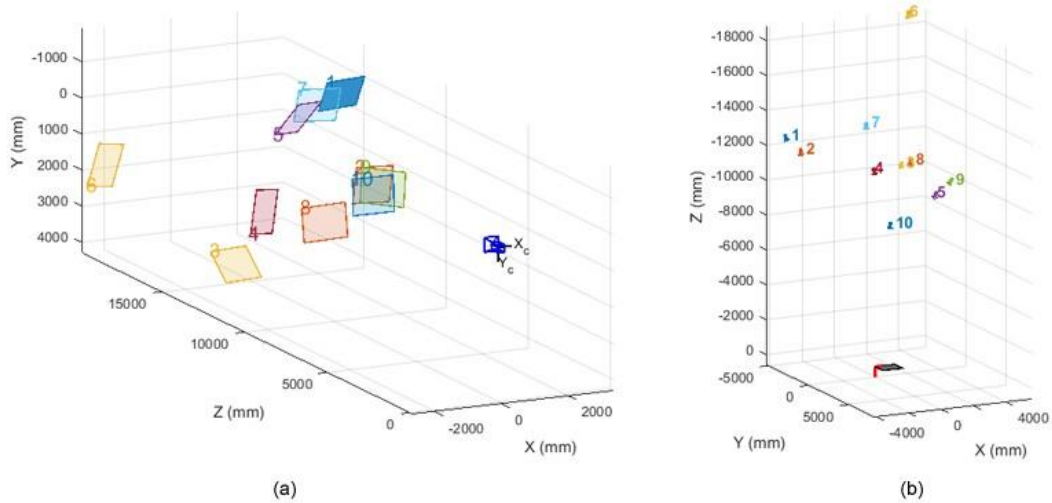
Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Erros estimados com o *Camera Calibration with MATLAB* para imagens com padrão distante da câmera

Erros Estimados	Valor (pixel)
Erro de Distorção Radial	[0.3655 8.6513]
Erro de Distância da Lente Focal	[184.2531 178.9814]
Erro de Ponto Principal	[15.0246 17.3331]

Fonte: Autoria própria.

Um novo conjunto de imagens foi inserido, repetindo o processo de calibração. Esse conjunto agrupa imagens em que o padrão de calibração se encontra visualmente mais próximo à câmera. A visualização dos parâmetros obtidos desse conjunto de imagens é vista na Figura 12



**Figura 12 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão próximo à câmera, gerada pelo *Camera Calibration with MATLAB*.
Fonte: Autoria própria.**

Assim como descrito na Figura 11, os alvos de calibração são projetados e representados pelos coloridos e seus respectivos números, em visualização (a) frontal e (b) superior do plano.

As tabelas 3 e 4 mostram os resultados obtidos nessa calibração.

Tabela 3 – Parâmetros de calibração obtidos com o *Camera Calibration with MATLAB* para imagens com padrão próximo à câmera

Parâmetros da Calibração	Valor (<i>pixel</i>)
Distorção Radial	[0.0306 – 0.0473]
Distância da Lente Focal	[$1.8247e^{+03}$ $1.8259 e^{+03}$]
Ponto Principal	[$1.2789 e^{+03}$ 724.9084]
Média de Reprodução de Erro	0.4212

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Erros estimados com o *Camera Calibration with MATLAB* para imagens com padrão próximo à câmera

Erros Estimados	Valor (pixel)
Erro de Distorção Radial	[0.0552 0.3924]
Erro de Distância da Lente Focal	[49.7982 50.1499]
Erro de Ponto Principal	[17.0566 22.4200]

Fonte: Autoria própria.

Em uma rápida análise entre as tabelas, nota-se a diferença entre os valores apresentados como resultado da calibração. Esses dados mostram a diferença de precisão para quando a calibração é realizada considerando apenas objetos distantes e para quando a calibração considera apenas objetos próximos. Os resultados obtidos mostram que o *toolbox* utilizado estima erros menores quando a calibração é realizada com o padrão próximo à câmera.

Uma última calibração foi realizada envolvendo este *toolbox*, dessa vez incluindo os dois conjuntos de imagens para o mesmo processo. A Figura 13 mostra a visualização do processo

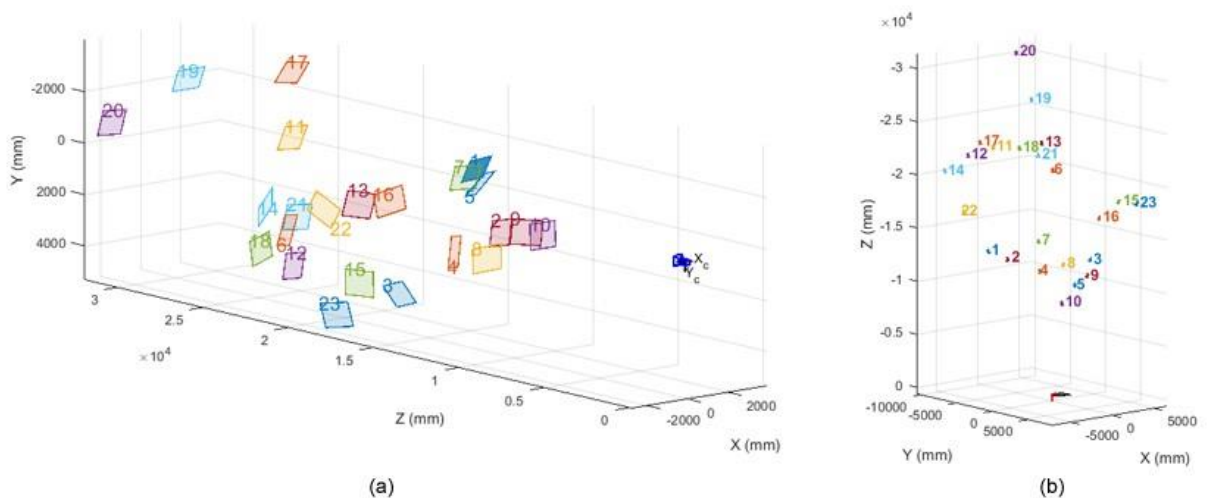


Figura 13 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão próximo e distante à câmera, gerada pelo *Camera Calibration with MATLAB*.

Fonte: Autoria própria.

Assim como descrito na Figura 11 os alvos de calibração são projetados e representados pelos quadrados coloridos e seus respectivos números, em visualização (a) frontal e (b) superior do plano.

As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos nessa etapa.

Tabela 5 – Parâmetros de calibração obtidos com o *Camera Calibration with MATLAB* para imagens com padrão próximo e distante à câmera

Parâmetros da Calibração	Valor (pixel)
Distorção Radial	[0.0407 - 0.3126]
Distância da Lente Focal	[1.9243e ⁺⁰³ 1.9247 e ⁺⁰³]
Ponto Principal	[1.2909 e ⁺⁰³ 740.6124]
Média de Reprodução de Erro	0.3238

Fonte: Autoria própria.

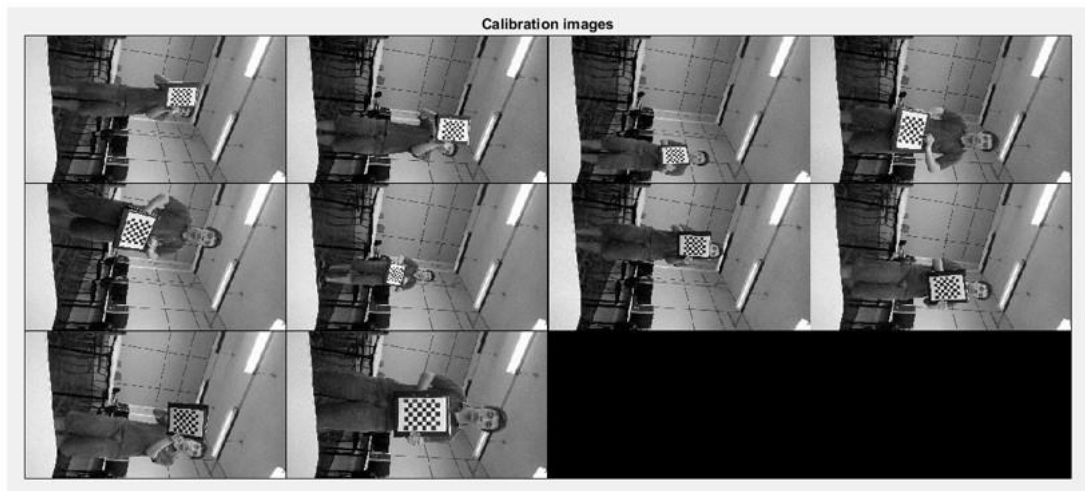
Tabela 6 – Erros estimados com o *Camera Calibration with MATLAB* para imagens com padrão próximo e distante à câmera

Erros Estimados	Valor (pixel)
Erro de Distorção Radial	[0.0455 0.3536]
Erro de Distância da Lente Focal	[38.1239 38.4387]
Erro de Ponto Principal	[11.9684 14.7770]

Fonte: Autoria própria.

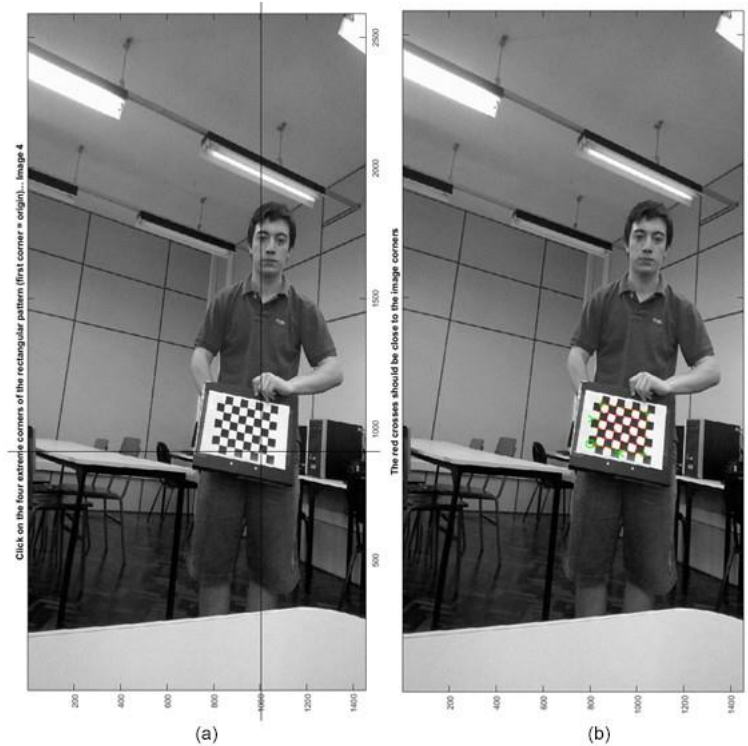
A calibração realizada utilizando os dois grupos de imagens permitiu ao método uma quantidade maior de amostras, o que torna o resultado mais confiável devido às diversas disposições em que a cena pode ser encontrada. Uma maior quantidade de imagens utilizadas permite que o método tenha maior precisão quanto aos seus resultados.

O conjunto de imagens em que visualmente o padrão de calibração está posicionado mais próximo à câmera foi utilizado no *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Esse *toolbox* realiza a leitura das imagens a partir de um sufixo estabelecido dentro do diretório e aplica um pré-processamento em que transformando sua paleta de cores em escala de cinzas. O método aplicado nesse *toolbox* foi descrito na Seção 3.3. A Figura 14 mostra o conjunto de imagens utilizadas.



**Figura 14 – Conjunto de imagens utilizadas no *Camera Calibration Toolbox for Matlab*.
Fonte: Autoria própria.**

Após a leitura das imagens pelo programa, realiza-se a extração dos cantos do tabuleiro. Essa extração é realizada manualmente tendo o usuário que selecioná-los clicando na imagem (conforme Figura 15, onde a linha horizontal e a vertical representam o cursor do mouse). Por essa seleção ser suscetível à erros, foram escolhidas imagens onde o alvo se encontra mais próximo à câmera, facilitando a identificação dos cantos.

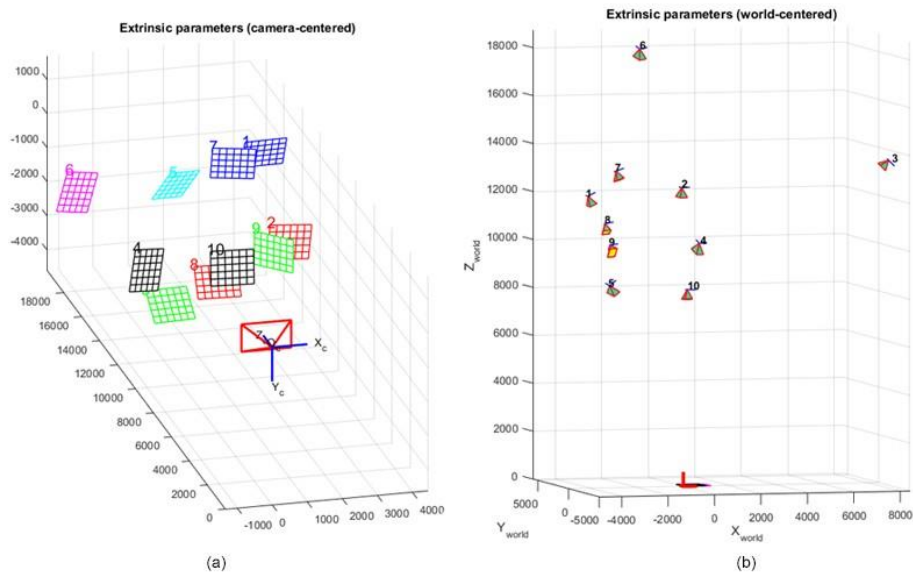


**Figura 15 – Leitura dos cantos do padrão realizada de modo manual no *Camera Calibration Toolbox for Matlab*.
Fonte: A autoria própria.**

Assim como no *toolbox* do MATLAB, é possível a visualização dos parâmetros extrínsecos obtidos, mostrados na Figura 16.

Pôr a seleção manual dos cantos do tabuleiro apresentarem valores diferentes devido à precisão do usuário, do mouse e/ou da máquina utilizada, diferentes testes foram realizados com o mesmo conjunto de imagem. Os valores contidos nas tabelas 7 e 8 correspondem a média dos resultados obtidos.

É possível que a cada nova calibração, sejam inseridos valores das calibrações anteriores como parâmetros iniciais, aumentando assim a precisão dos resultados.



**Figura 16 – Visualização dos parâmetros extrínsecos em imagens com padrão próximo à câmera, gerada pelo *Camera Calibration Toolbox for Matlab*.
Fonte: Autoria própria.**

Assim como descrito na Figura 11, os alvos de calibração são projetados e representados pelos quadrados coloridos e seus respectivos números, em visualização (a) frontal e (b) superior do plano.

Tabela 7 – Parâmetros de calibração obtidos com o *Camera Calibration Toolbox for Matlab* para imagens com padrão próximo à câmera

Parâmetros da Calibração	Valor (pixel)
Distorção Radial	[-0.01808 - 0.16377]
Distância da Lente Focal	[1.8267e+03 1.8197 e+03]
Ponto Principal	[1.1342e+03 683.0932]

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Erros estimados com o *Camera Calibration Toolbox for Matlab* para imagens com padrão próximo à câmera

Erros Estimados	Valor (pixel)
Erro de Distorção Radial	[0.1271 0.4176]
Erro de Distância da Lente Focal	[155.4142 152.7371]
Erro de Ponto Principal	[119.6023 95.3842]

Fonte: Autoria própria.

Os dois *toolbox's* utilizados apresentaram parâmetros próximos na calibração. Essa proximidade pode ser observada comparando os resultados dos métodos acrescentados do módulo de seu erro, ou seja, acrescentando ou diminuindo o valor de retorno com o erro estimado. Com isso tem-se que o resultado de um está contido na faixa correspondida da margem de erro do outro. Essa comparação pode ser melhor visualizada na Figura 17.

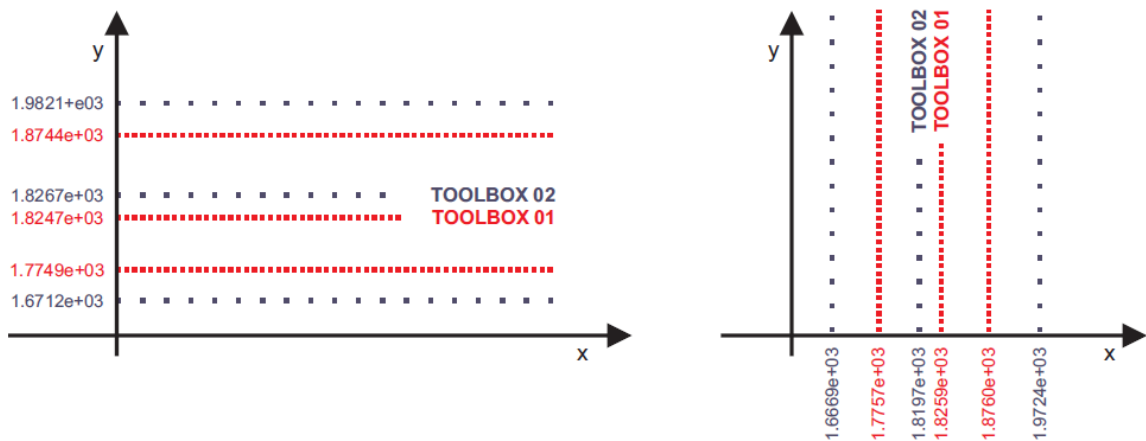


Figura 17 – Gráfico de comparação entre a distância focal estimada pelos *toolbox's* *Camera Calibration with MATLAB* (01) e *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (02)

Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 17, o valor estimado para a distância focal pelo *Camera Calibration with MATLAB* (01) é de $1.8247e^{+03}$ pixels no eixo x. Considerando o erro estimado, tem-se o valor máximo de $1.8744e^{+03}$ pixels e mínimo de $1.7749e^{+03}$ pixels.

O valor estimado pelo *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (02) está dentro da faixa obtida pelo *Camera Calibration with MATLAB* (01), com o valor estimado de $1.8267e^{+03}$ pixels. O mesmo acontece quando se compara a margem de erro do *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (02), com $1.6712e^{+03}$ como valor mínimo e $1.9821e^{+03}$ como valor máximo estimado pelo *Camera Calibration with MATLAB* (01).

Os *toolbox's* apresentados possuem processos semelhantes de obtenção de imagens e apresentação dos resultados, considerando que o reconhecimento do padrão de um método é realizado automaticamente e o outro precisa ter os cantos inseridos manualmente. Com a apresentação dos testes realizados, nota-se que os resultados tendem a ser mais precisos conforme a quantidade de imagens utilizadas na calibração. A seguir, apresentam-se testes em dois outros *toolbox's* que realizam o processamento de calibração de forma individual, usando apenas uma imagem.

O *Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox* encontrado apresenta um método de otimização convexa para distorção radial da lente em uma única imagem de um padrão planar, utilizando restrições de monotonicidade da função de distorção radial. A descrição do método encontra-se na Seção 3.2.

Com a leitura da imagem realizada, o *toolbox* identifica automaticamente o padrão de calibração. Após a identificação do padrão, o *toolbox* calcula o centro de distorção da imagem, retornando os valores de calibração presentes na Tabela 9 e aplicando a correção na imagem. O comportamento do método na imagem é exemplificado na Figura 18, em que o tabuleiro é identificado com linhas vermelhas no primeiro quadro, o ponto correspondente ao centro de distorção da imagem é identificado no segundo quadro e a imagem corrigida gerada pelo método é apresentada no terceiro quadro.

Tabela 9 – Parâmetros de calibração obtidos com o *Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox* para imagem individual

Parâmetros da Calibração	Valor (pixel)
Centro de Distorção	[894 1479]
Homografia da Distorção de Calibração	$\begin{bmatrix} 0.3954 & -0.0009 & -0.7138 \\ 0.0030 & 0.3955 & -0.4216 \\ 0.0009 & -0.0007 & 1.0000 \end{bmatrix}$
Centro de Distorção Radial	[1.0938]
Fator de Correção da Distorção	- 4.4148e ⁻⁸

Fonte: Autoria própria.



Figura 18 – Ciclo de calibração do *Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox*, com (a) detecção do padrão, do (b) centro de distorção e a (c) correção da imagem.
 Fonte: Autoria própria.

A mesma imagem foi utilizada no *Vanishing Point Detection and Camera Calibration*. Este, por sua vez, utiliza o reconhecimento de segmentos de linhas na imagem, estimando três pontos ortogonais, chamados de *vanishing points* (pontos de

fuga) e a distância focal da câmera que capturou, conforme apresentado na Seção 3.5. A Tabela 10 e a Figura 19 exibem os valores encontrados no teste realizado.

Tabela 10 – Parâmetros de calibração obtidos com o *Vanishing Point Detection and Camera Calibration* para imagem individual.

Parâmetros da Calibração	Valor (pixel)
Coordenadas dos Pontos de Fuga	$\begin{bmatrix} 1288.890236 & -8200.197277 \\ 1192.216728 & 1246.335595 \\ -40533.188293 & 1279.562661 \end{bmatrix}$
Distância Focal Estimada	- 4.4148e ⁺³

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

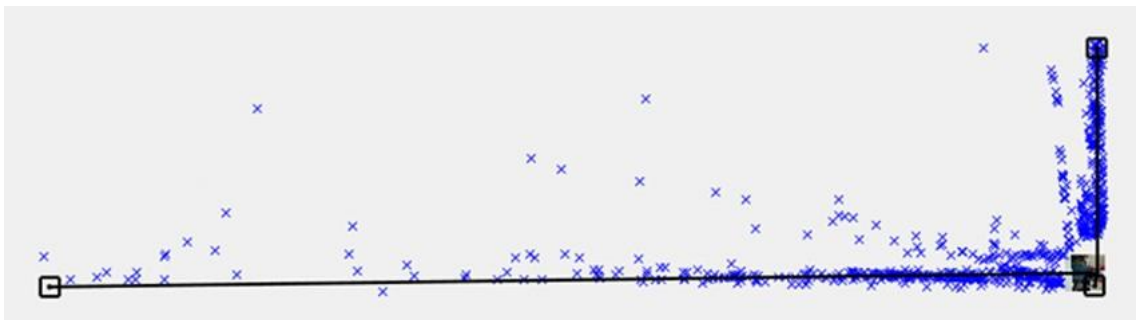


Figura 19 – Três pontos de fuga ortogonais estimados pelo *Vanishing Point Detection and Camera Calibration* a partir de segmentos de linha que se interceptam no infinito.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 mostra a intersecção de todas as linhas detectadas na imagem, marcadas por cruces na cor azul, e a identificação (detecção) dos três pontos de fuga, representados pelos quadrados pretos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Todos os métodos estudados Zhang (ZHANG, 2000), Hartley e Kang (HARTLEY; KANG, 2007), Heikkil e Silven (HEIKKILA; SILVÉN, 1997), Bakstein e Halir (BAKSTEIN; HALIR, 2000) e Vanishing Points (CAPRILE; TORRE, 1990), possuem precisão em seus dados de retorno, tornando a escolha de acordo com as características do ambiente. Leva-se em consideração a posição e a distância do padrão na imagem, como o método de *Vanishing Points*, onde não é utilizado um alvo de calibração, mas segmentos de retas no ambiente.

6.1 CONCLUSÕES

Como demonstrado no Capítulo 5, os *toolbox's* apresentam resultados diferentes, sendo vantajosos ou não de acordo com a cena à ser aplicado.

O *toolbox Camera Calibration with MATLAB* apresentou bons resultados quando disponibilizadas ao menos 10 imagens para a calibração. Como vantagem tem seu processo simples e intuitivo, sendo feito de forma automática pela aplicação. Ao usuário basta informar o tamanho do quadrado contido no tabuleiro (em milímetros, centímetros ou metros). O *toolbox* se mostrou o mais completo dentre os estudados, como desvantagem nota-se apenas a impossibilidade de utilizar resultados de uma calibração anterior como parâmetros iniciais de uma nova.

O *toolbox Camera Calibration Toolbox for Matlab* apresenta resultados próximos aos do *Camera Calibration with MATLAB*, conforme visto na Figura 17. Sua desvantagem é a necessidade de extrair os cantos do tabuleiro de forma manual, o que pode ser exaustivo de acordo com a quantidade de imagens utilizadas e, por depender da precisão do mouse, dos pixels que formam os cantos na tela e do usuário, se torna um método suscetível a erros. A vantagem encontrada na utilização do método, é a possibilidade de uma nova calibração utilizando como parâmetros iniciais os dados obtidos em uma calibração anterior.

O *toolbox Super-Wide-Angle-lens Radial Distortion Toolbox* apresenta parâmetros diferentes em seu resultado, o que impossibilita uma comparação direta

com os demais métodos. A vantagem desse *toolbox* é não ter a necessidade de utilizar um conjunto de imagens diferentes com o alvo de calibração posicionado em várias angulações e distâncias distintas. A correção da distorção é apresentada com a utilização de apenas uma imagem. A Figura 18 encontrada no Capítulo 5 mostra que a imagem corrigida apresenta resultados significativos para lentes grande angulares. A desvantagem do *toolbox* acontece quando são encontrados outros formatos de lentes e distorções, perdendo sua eficiência em localizar o centro de distorção da imagem e, conseqüentemente, a correção da imagem gerada torna-se imprecisa.

A calibração realizada pelo *toolbox Vanishing Point Detection and Camera Calibration* não utiliza um alvo de calibração planar como os outros *toolbox's* apresentados. Seus parâmetros são estimados a partir de intersecções de segmentos de retas encontrados na imagem. O *toolbox* possui a vantagem de ser necessária somente uma imagem em que são detectados três pontos de fuga ortogonais e a distância focal é estimada, sem a necessidade de especificar pontos de correspondências, podendo ser completamente automático. Tem como desvantagem a imprecisão do cálculo de um ponto de fuga, com dificuldades quando os pontos de fuga são encontrados no infinito.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos com os experimentos realizados inspiraram novas ideias para a continuação dos estudos do processo de calibração de câmeras. Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Modelagem de um ambiente externo com grandes dimensões, para resultados mais precisos na comparação entre os métodos estudados. Feito isso, gerar novos testes de variações angulares e distâncias comparando como um todo, por grupo e individualmente. Um exemplo de ambiente à ser modelado, a quadra esportiva da Universidade, com câmeras posicionadas em suas diagonais, de modo à ter uma visão total com alguma sobreposição entre as imagens (para que se possa ter uma visão geral da cena e não existir pontos cegos);

- Inclusão de novos métodos de calibração de câmera, em busca de características que otimizem o resultado da calibração, com o intuito de uma calibração híbrida para os diferentes cenários e ambientes;
- Calibração de um sistema com câmeras diferentes e/ou formatos de lentes diferentes. No cenário atual, câmeras com lentes grande angular são utilizadas em vários ambientes. Essas lentes são conhecidas como "olho de peixe", e proporcionam uma visão mais ampla do panorama. Sua desvantagem é que para aumentar o raio de visão, os objetos são distorcidos, aumentando a necessidade de uma calibração eficiente para extrair as características da cena, principalmente a distorção radial;
- Aplicação dos métodos em cenas dinâmicas, com movimentação da cena através da câmera. Livrementemente chamada de calibração continuada, após uma calibração inicial a câmera é movimentada e uma nova calibração deve ser feita. Essa nova calibração pode utilizar os parâmetros iniciais providos pela calibração anterior.

REFERÊNCIAS

BAKSTEIN, H.; HALIR, R. Camera calibration with a simulated three dimensional calibration object. In: **Czech pattern recognition workshop**. [S.l.: s.n.], p. 1231–1238, 2000.

CAPRILE, B.; TORRE, V. Using vanishing points for camera calibration. **International journal of computer vision**, Springer, v. 4, n. 2, p. 127–139, 1990.

COURBON, J. *et al.* A generic fisheye camera model for robotic applications. In: **IEEE. Intelligent Robots and Systems**, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. [S.l.], p. 1683–1688, 2007.

FOLEY, J. D. *et al.* **Introduction to computer graphics**. [S.l.]: Addison-Wesley Reading, 1994.

FRANÇA, J. A. D. **Desenvolvimento de Algoritmos de Visão Estereoscópica para Aplicações em Robótica Móvel**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em: <<http://www.uel.br/pessoal/josealexandre/doutorado/franca03desenvolvimento.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2015.

FRANÇA, J. A. de *et al.* Uma implementação do algoritmo levenberg-marquardt dividido para aplicações em visão computacional. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 30, n. 1, p. 51–62, 2009.

HARTLEY, R.; KANG, S. B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation. **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 29, n. 8, p. 1309–1321, 2007.

HEIKKILA, J.; SILVÉN, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: **IEEE. Computer Vision and Pattern Recognition**, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on. [S.l.], 1997. p. 1106–1112.

HERMOSILLO, G.; MONTERREY. A range-finder calibration for a mobile robot. **ITESM-Campus**, Citeseer, 1997.

HIERONYMUS, J. Comparison of methods for geometric camera calibration. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, p. 595–599, 2012.

KANNALA, J.; BRANDT, S. A generic camera calibration method for fish-eye lenses. In: IEEE. **Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on**. [S.l.], v. 1, p. 10–13, 2004.

KÖHLER, D.-I. F. T.; WESTERMANN, R. **Comparison of Self-Calibration Algorithms for Moving Cameras**. [S.l.]: University of Applied Sciences Munich, 2010.

LOAIZA, M. E.; RAPOSO, A. B.; GATTASS, M. Calibração de múltiplas câmeras baseado em um padrão invariante. In: **Proc. XII Symposium on Virtual and Augmented Reality**, v. 1. [S.l.: s.n.], p. 212–221, 2010.

LOURAKIS, M. I. A brief description of the levenberg-marquardt algorithm implemented by levmar. **Foundation of Research and Technology**, v. 4, p. 1–6, 2005.

MELEN, T. **Geometrical modelling and calibration of video cameras for underwater navigation**. Dissertação (Mestrado) — Norges Tekniske Høgskole Trondheim, 1994.

POLIDORIO, A. M.; BORTOLOZZI, F.; FIGUEIREDO, M. Calibração geométrica de câmeras, aplicando o método dos mínimos quadrados. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 20, p. 495–503, 2008.

SOUZA, J. K. S. de; CAMPOS, M. F. M. Um dispositivo automático para aquisição da forma 3d de objetos. **SIBGRAPI 98 - International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision**, 1998.

TEIXEIRA, C. E. P. **Ensino Rápido de Manipuladores Industriais**. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60519/1/000135210.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

TRUCCO, E.; VERRI, A. **Introductory techniques for 3-D computer vision**. [S.l.]: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1998.

WANG, Y. Q. An analysis of the viola-jones face detection algorithm. **Image Processing On Line**, v. 4, p. 128–148, 2014.

WEI, G. Q.; MA, S. A complete two-plane camera calibration method and experimental comparisons. In: IEEE. **Computer Vision, 1993. Proceedings., Fourth International Conference on.** [S.l.], p. 439–446, 1993.

ZHANG, Z. A. flexible new technique for camera calibration. **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 22, n. 11, p. 1330–1334, 2000.